

лемні питання щодо нормативної бази з визначення показників якості вогнебіозахисних засобів для деревини та розробки їх рецептур // Науковий вісник УкрНДІПБ. – К.: УкрНДІПБ, 2003. – №1 (8). – С. 41-45.

7.Справочник по коррозии: Пер. с болг. / Пер. С.И.Нейковского; Под ред. и с предисл. Н.И.Исаева. – М.: Мир, 1982. – 520 с.

Отримано 28.06.2004

УДК 614.84 : 628.174

В.П.ОЛЬШАНСКИЙ, д-р физ.-матем. наук
Академия гражданкой защиты Украины, г.Харьков

О ВЫБОРЕ ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ ПРИ РАСЧЕТЕ ТРАЕКТОРИИ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ПОЖАРНОЙ СТРУИ

Приводятся рекомендации к выбору величины коэффициента пропорциональности в линейной зависимости силы сопротивления воздуха от скорости потока жидкости. Построены графики и таблицы значений коэффициента для расчета траекторий струй, создаваемых ручными пожарными стволами.

Для повышения эффективности использования гидравлических струй при тушении пожаров во многих публикациях рассматривалась баллистика частиц жидкости. Для описания стационарных течений в работах [1-8] применялись уравнения движения материальной точки, составленные в предположении, что сила сопротивления воздуха пропорциональна первой степени скорости потока жидкости. Расчетные параметры траектории оказались сильно зависящими от значения коэффициента сопротивления. Установлено, что при надлежащем его выборе удастся достичь удовлетворительного согласования теории с экспериментом по дальнобойности струи [5]. Однако остается неясным, как связана величина коэффициента сопротивления с диаметром spryska ствола D_0 , эффективным напором H , а также другими параметрами истечения струи. Именно эта информация необходима, чтобы приспособить общие аналитические решения уравнений движения материальной точки к расчету траекторий струй, создаваемых пожарными стволами.

Некоторые сведения о значениях коэффициента сопротивления имеются в работах [5, 7]. Они получены путем идентификации из условия наилучшего приближения теоретических результатов к экспериментальным. Но такая методология делает зависящей теорию от наличия экспериментов, что существенно сужает ее возможности. Поэтому нужна дальнейшая разработка способов определения коэффициента сопротивления.

В настоящей работе ставится задача приближенного определения коэффициента сопротивления движению в условиях отсутствия экспериментальных данных. Вместо них предлагается использовать известные теоретические результаты, достоверность которых находится вне сомнений. Далее такими принимаются значения высоты вертикальной струи, вычисленные В.Г.Лобачевым [9] для различных напоров H и диаметров spryska ствола D_0 , которые используют и другие авторы [10-12] в курсах противопожарного водоснабжения.

В теории линейного сопротивления движению координаты x и y частиц жидкости на траектории связаны соотношением [5, 8]

$$y(x) = \xi x + \frac{x}{\eta} \sqrt{1 + \xi^2} + \frac{2H}{\eta^2} \ln \left(1 - \frac{x\eta}{2H} \sqrt{1 + \xi^2} \right), \quad (1)$$

где $\xi = tg \theta_0$; θ_0 – угол наклона оси ствола к горизонту; $\eta = \alpha \sqrt{2H/g}$ – безразмерный критерий, пропорциональный коэффициенту сопротивления α ; g – ускорение свободного падения.

Предполагается, что истечение струи происходит в начале координат. Для расчета траектории достаточно знать H , θ_0 и величину безразмерного критерия η . Поэтому далее будем определять не α , а η .

Отношение высоты вертикальной струи S_b к эффективному напору H при линейном сопротивлении движению равно [5]

$$\varepsilon = SH^{-1} = \frac{2}{\eta} \left[1 - \frac{1}{\eta} \ln(1 + \eta) \right]. \quad (2)$$

Оно зависит только от η .

Для ручных пожарных стволов, у которых $D_0 \leq 25$ мм, отношение ε , с приемлемой точностью, можно найти по формуле Люгера [9, 10]

$$\varepsilon = (1 + \chi H)^{-1}, \quad (3)$$

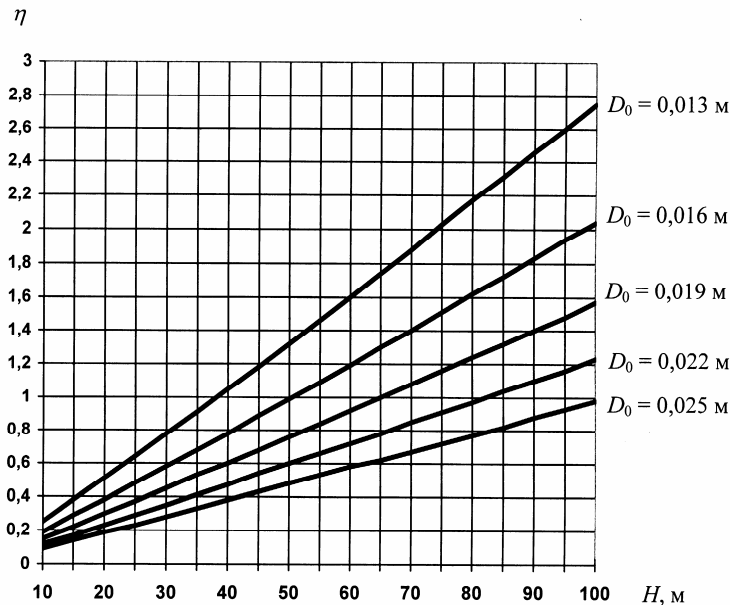
где $\chi = 0,00025 \cdot (D_0 + 1000D_0^3)^{-1}$, D_0 – выражено в метрах.

Благодаря этой формуле была составлена таблица В.Г.Лобачева, рекомендованная для практических расчетов пожарных струй [9].

Выражения (2), (3) приводят к трансцендентному уравнению для определения критерия η

$$\varepsilon = \frac{2}{\eta} \left[1 - \frac{1}{\eta} \ln(1 + \eta) \right] = (1 + \chi H)^{-1}. \quad (4)$$

Значения η зависят от D_0 и H . Эта зависимость представлена графически на рисунке.



Зависимость η от H и D_0

Вычисление корней трансцендентного уравнения (4) показало, что меньшим диаметрам sprays ствола соответствуют большие значения η . С ростом напора H растет и величина η по закону близкому к линейному. Поэтому в области $10 \leq H \leq 100$ м без больших погрешностей графики можно аппроксимировать выражением

$$\eta \approx \alpha(D_0) + \frac{1}{90} (b(D_0) - a(D_0))(H - 10). \quad (5)$$

Для рассматриваемых стандартных диаметров насадка ствола константы $a(D_0)$ и $b(D_0)$ принимают значения, указанные в табл.1.

В дополнение к этой информации приводим аналог таблицы В.Г.Лобачева [9-11], заменив там имеющиеся величины расхода на значения η . Преобразованная таким образом табл.2 будет полезна для

оперативного определения не только высоты вертикальной струи, но и радиуса ее компактной части R_k .

Таблица 1 – Значения $a(D_0)$ и $b(D_0)$

| | | | | | |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| D_0 , м | 0,013 | 0,016 | 0,019 | 0,022 | 0,025 |
| $a(D_0)$ | 0,25 | 0,19 | 0,15 | 0,12 | 0,09 |
| $b(D_0)$ | 2,75 | 2,04 | 1,57 | 1,23 | 0,98 |

Таблица 2 – Значения R_k , S_b , и η для разных H и D_0

| R_k , м | S_b , м | $D_0=0,013$ м | | $D_0=0,016$ м | | $D_0=0,019$ м | | $D_0=0,022$ м | | $D_0=0,025$ м | |
|--------------|--------------|---------------|--------|---------------|--------|---------------|--------|---------------|--------|---------------|--------|
| | | H , м | η | H , м | η | H , м | η | H , м | η | H , м | η |
| 6 | 7,1 | 8,1 | 0,20 | 7,8 | 0,15 | 7,7 | 0,11 | 7,6 | 0,08 | 7,5 | 0,07 |
| 7 | 8,3 | 9,7 | 0,24 | 9,3 | 0,18 | 9,1 | 0,13 | 8,9 | 0,10 | 8,8 | 0,08 |
| 8 | 9,5 | 11,3 | 0,28 | 10,8 | 0,21 | 10,5 | 0,15 | 10,3 | 0,12 | 10,1 | 0,09 |
| 9 | 10,8 | 13,1 | 0,33 | 12,4 | 0,24 | 12,0 | 0,18 | 11,7 | 0,14 | 11,5 | 0,11 |
| 10 | 12,0 | 14,9 | 0,38 | 14,1 | 0,27 | 13,5 | 0,20 | 13,2 | 0,15 | 12,9 | 0,12 |
| 11 | 13,2 | 16,9 | 0,43 | 15,8 | 0,30 | 15,2 | 0,22 | 14,7 | 0,17 | 14,4 | 0,13 |
| 12 | 14,5 | 19,0 | 0,48 | 17,7 | 0,34 | 16,8 | 0,25 | 16,3 | 0,19 | 15,9 | 0,15 |
| 13 | 15,8 | 21,3 | 0,54 | 19,6 | 0,38 | 18,6 | 0,28 | 17,9 | 0,21 | 17,5 | 0,16 |
| 14 | 17,1 | 23,8 | 0,61 | 21,7 | 0,42 | 20,5 | 0,30 | 19,7 | 0,23 | 19,1 | 0,18 |
| 15 | 18,5 | 26,5 | 0,68 | 24,0 | 0,46 | 22,5 | 0,33 | 21,5 | 0,25 | 20,8 | 0,19 |
| 16 | 19,9 | 29,5 | 0,76 | 26,4 | 0,51 | 24,6 | 0,37 | 23,4 | 0,27 | 22,7 | 0,21 |
| 17 | 21,4 | 32,9 | 0,85 | 29,1 | 0,56 | 26,9 | 0,40 | 25,5 | 0,30 | 24,6 | 0,23 |
| 18 | 22,9 | 36,8 | 0,96 | 32,1 | 0,62 | 29,5 | 0,44 | 27,8 | 0,33 | 26,7 | 0,25 |
| 19 | 24,6 | 41,3 | 1,08 | 35,4 | 0,69 | 32,3 | 0,48 | 30,3 | 0,36 | 29,0 | 0,27 |
| 20 | 26,4 | 46,5 | 1,23 | 39,2 | 0,77 | 35,4 | 0,53 | 33,0 | 0,39 | 31,5 | 0,30 |
| 21 | 28,3 | 52,8 | 1,40 | 43,6 | 0,86 | 38,9 | 0,59 | 36,1 | 0,43 | 34,2 | 0,32 |
| 22 | 30,3 | 60,4 | 1,61 | 48,6 | 0,96 | 42,9 | 0,65 | 39,4 | 0,47 | 37,2 | 0,35 |
| 23 | 32,5 | 69,9 | 1,88 | 54,6 | 1,08 | 47,4 | 0,72 | 43,3 | 0,51 | 40,7 | 0,39 |
| 24 | 34,9 | 82,1 | 2,23 | 61,8 | 1,23 | 52,7 | 0,80 | 47,7 | 0,57 | 44,5 | 0,42 |
| 25 | 37,6 | 98,3 | 2,70 | 70,5 | 1,41 | 59,0 | 0,90 | 52,7 | 0,63 | 48,9 | 0,47 |
| 26 | 40,4 | - | - | 81,4 | 1,65 | 66,4 | 1,02 | 58,6 | 0,70 | 53,8 | 0,51 |
| 27 | 43,6 | - | - | 95,3 | 1,94 | 75,4 | 1,17 | 65,5 | 0,79 | 59,6 | 0,57 |
| 28 | 47,1 | - | - | - | - | 86,4 | 1,34 | 73,6 | 0,89 | 66,3 | 0,64 |
| 29 | 50,9 | - | - | - | - | - | - | 83,5 | 1,02 | 74,2 | 0,72 |
| 30 | 55,1 | - | - | - | - | - | - | 95,4 | 1,17 | 83,5 | 0,81 |

В случае применения насадок нестандартного диаметра, который меньше 25 мм, приближенное определение η можно провести с помощью табл.3, построенной путем численного решения уравнения (4).

В качестве примера, определим значение η при $D_0 = 0,018$ м, $H=75$ м. Подставив указанные исходные данные в формулу (3), полу-

чаем $\varepsilon = 0,56$. Методом интерполяции по табл.3 находим $\eta \approx 1,27$.

Если воспользоваться результатами работы [6], то приближенное вычисление η в области $0,013 \leq D_0 \leq 0,025$ м можно также выполнить по формуле

$$\eta = 2H \frac{K_c}{\rho}, \quad (6)$$

где ρ – плотность огнетушащей жидкости;

$$K_c = 13,285 - 2,753\xi - 1,433 \sin \xi - 0,217 \sin(2\xi) - 0,035 \sin(3\xi),$$

$$\xi = \frac{D_0 - 0,013}{0,012} \pi;$$

D_0 – выражено в метрах.

Таблица 3 – Зависимость η от ε

| η | ε | η | ε | η | ε |
|--------|---------------|--------|---------------|--------|---------------|
| 0,20 | 7,04 | 0,50 | 1,62 | 0,80 | 0,39 |
| 0,25 | 5,19 | 0,55 | 1,32 | 0,85 | 0,27 |
| 0,30 | 3,98 | 0,60 | 1,06 | 0,90 | 0,17 |
| 0,35 | 3,12 | 0,65 | 0,85 | 0,92 | 0,13 |
| 0,40 | 2,49 | 0,70 | 0,67 | 0,95 | 0,08 |
| 0,45 | 2,01 | 0,75 | 0,52 | 0,97 | 0,05 |

Для рассмотренных выше исходных данных при $\rho = 1000 \text{ кгм}^{-3}$ вычисления по формуле (6) дают $\eta = 1,25$, что незначительно отличается от найденного прежде значения.

Таким образом, определение безразмерного критерия η для ручных пожарных стволов не вызывает затруднений.

Зная η , с помощью решения (1) легко найти координаты точек на траектории струи. Вычислим их при $D_0 = 0,022$ м; $H = 64$ м; $\theta_0 = 52^\circ$. Для этих исходных данных по формуле (5) получаем $\eta \approx 0,79$. Задав $\xi = \text{tg } 52^\circ \approx 1,28$, вычисляем y в зависимости от значений x , что отражено в табл.4.

Наиболее высокая точка траектории имеет координаты $x_e \approx 38,3$ м; $y_e \approx 28,4$ м. Горизонтальная протяженность струи приблизительно равна 65,2 м, что немного больше эффективного напора.

Таблица 4 – Координаты точек на траектории струи

| х, м | у, м | х, м | у, м | х, м | у, м |
|------|-------|------|-------|------|-------|
| 4 | 4,95 | 28 | 25,84 | 52 | 22,39 |
| 8 | 9,54 | 32 | 27,42 | 56 | 17,79 |
| 12 | 13,74 | 36 | 28,28 | 60 | 11,47 |
| 16 | 17,52 | 40 | 28,33 | 64 | 3,06 |
| 20 | 20,83 | 44 | 27,47 | 65 | 0,58 |
| 24 | 23,62 | 48 | 25,54 | 65,2 | 0,06 |

Таким образом, с помощью построенных формул или таблиц удобно находить величину критерия, характеризующего линейное сопротивление воздуха потоку жидкости. Это дает возможность рассчитывать траектории наклонных струй, создаваемых ручными пожарными стволами с различными диаметрами насадков и различными начальными напорами.

1.Грицына И.Н. Математическая модель движения капельного потока огнетушащей жидкости // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. Вып. 3. – Харьков: ХИПБ, 1998. – С. 55-57.

2.Рева Г.В., Куценко Л.М., Росоха С.В. Анімаційне комп'ютерне моделювання деяких процесів в задачах пожежної безпеки // Проблемы пожарной безопасности. Юбилейный выпуск. – Харьков: АПБУ, 2003. – С. 147-163.

3.Росоха С.В. Геометрична форма струменя рідини з пожежного ствола з урахуванням опору повітря // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. Вип.4. Прикладна геометрія та інженерна графіка. Т. 16. – Мелітополь: ТДАТА, 2002. – С. 88-92.

4.Запольский Л.Л. Моделирование траектории доставки засобів пожежогасіння методом метання // Геометричне та комп'ютерне моделювання. Вип.5. – Харків: ХДУХТ, 2003. – С. 106-113.

5.Ольшанский В.П. О применении методов механики к расчету траектории пожарной гидравлической струи // Проблемы пожарной безопасности. Юбилейный выпуск. – Харьков: Академия пожарной безопасности Украины, 2003. – С. 136-146.

6.Ольшанский В.П. Об одной полуэмпирической теории гидравлической пожарной струи // Проблемы пожарной безопасности. Вып.13. – Харьков: Фолио, 2003. – С.107-113.

7.Ольшанский В.П., Халыпа В.М. К расчету параметров гидравлических пожарных струй // Проблемы пожарной безопасности: Сб. науч. тр. АПБУ. Вып.14. – Харьков: Фолио, 2004. – С.137-143.

8.Ольшанский В.П. О влиянии угла установки оси ствола на горизонтальную протяженность гидравлической пожарной струи // Геометричне та комп'ютерне моделювання. Вип.6. – Харків: ХДУХТ, 2004. – С. 33-39.

9.Лобачев В.Г. Противопожарное водоснабжение. – М.-Л.: Изд-во Министерства коммунального хозяйства РСФСР, 1950. – 330 с.

10.Качалов А.А., Воротынцев Ю.П., Власов А.В. Противопожарное водоснабжение. – М.: Стройиздат, 1985. – 286 с.

11.Иванов Е.Н. Противопожарное водоснабжение. – М.: Стройиздат, 1986. – 316 с.

12.Лаврівський З.В., Мандрус В.І. Технічна механіка рідин та газів. – Львів: Сполум, 2004. – 200 с.

Получено 31.05.2004